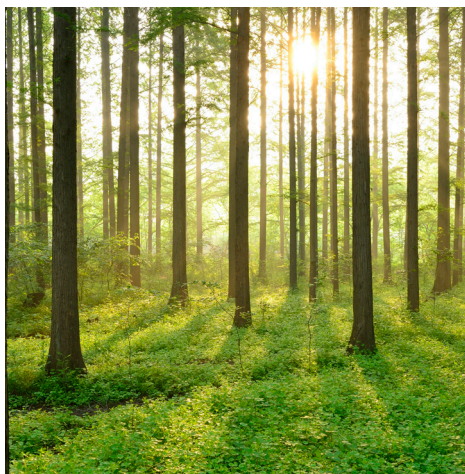


UPPSKATTNING AV DEN TEKNISKA LIVSLÄNGDEN HOS HYBRIDISOLERADE FJÄRRVÄRMERÖRR

RAPPORT 2021:799



Uppskattning av den tekniska livslängden hos hybridisolerade fjärrvärmerör

BIJAN ADL ZARRABI

ISBN 978-91-7673-799-6 | © Energiforsk oktober 2021

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

I projektet har livslängden av fjärrvärmerör med högpresterande isolering undersökts liksom återbetalningstiden för investering i dessa rör. Projektet är en fortsättning av de tidigare projekten inom Fjärrsyn och FutureHeat *Hybridisolerade fjärrvärmerör 2013:23* och *Livslängd för hybridisolerade fjärrvärmerör 2019:593*.

Projektet har letts och genomförts av Bijan Adl-Zarrabi från Chalmers tekniska högskola.

En referensgrupp bestående av Magnus Olsson, Öresundskraft (ordförande), Shahriar Badiei, Vattenfall och Zayed Azobidie, E.ON har följt och kvalitetssäkrat projektet.

Projektet ingår i programmet Futureheat vars långsiktiga mål är att bidra till visionen om ett hållbart uppvärmningssystem med framgångsrika företag som utnyttjar nya tekniska möjligheter och där de samhällsinvesteringar som gjorts i fjärrvärme- och fjärrkyla tas till vara på bästa sätt. Detta projekt ingår i programmets andra etapp.

Programmet leds av en styrgrupp bestående av Jonas Cognell, Göteborg Energi (ordförande); Anders Moritz, Tekniska verken i Linköping; Anna Hinderson, Vattenfall AB; Charlotte Tengborg, E.ON Värme Sverige; Fabian Levihn, Stockholm Exergi; Holger Feurstein, Kraftringen; Dan Bruhn, Jönköping Energi; Patrik Grönbeck, Borlänge Energi; Leif Bodinson, Söderenergi; Lena Olsson Ingvarson, Mölndal Energi; Magnus Ohlsson, Öresundskraft; Niklas Lindmark, Gävle Energi; Per Örvind, Eskilstuna Strängnäs Energi & Miljö; Petra Nilsson, Växjö Energi; Staffan Stymne, Norrenergi; Stefan Hjärtstam, Borås Energi och Miljö; Svante Carlsson, Skellefteå Kraft; Ulf Lindquist, Jämtkraft och Julia Kuylenstierna (adjungerande), Energiforsk.

Suppleanter utgörs av Ann Britt Larsson, Tekniska verken i Linköping och Peter Rosenkvist, Gävle Energi.

Julia Kuylenstierna, programansvarig FutureHeat

Här redovisas resultat och slutsatser från ett projekt inom ett forskningsprogram som drivs av Energiforsk. Det är rapportförfattaren/-författarna som ansvarar för innehållet.

Sammanfattning

I denna rapport studeras livslängden och återbetalnings-tiden för hybridisolerade fjärrvärmerör med vakuum-isolerade paneler. Försämringshastigheten bedöms vara mellan 0,5–1 % per år. Vid höga temperaturer, med en försämrings-hastighet av storleken 1%/år kommer det att ta 60 år för att uppnå värmekonduktiviteten 0,015 W/mK. Återbetalningstid för hybridisolerade fjärrvärmerör är i det acceptabla intervallet (3–9 år) för ett enkelt fjärrvärmerör. Användning av hybridisolerade rör är fördelaktigt speciellt om produktionstakten kan förbättras.

Cirka 10 % av värmeenergin som skickas ut i fjärrvärmenätet försvinner på grund av värmeförluster från fjärrvärmerören. Förlusten kan vara över 40 % för delar av nätet där energiuttaget är litet.

Högpresterande värmeisoleringsmaterial, vakuumisolerade paneler (VIP), har undersökts för isolering av fjärrvärmerör i de tidigare Fjärrsynprojekten Högpresterande fjärrvärmerör och Hybridisolerade fjärrvärmerör (Rapporter 2012:16, 2013:23, 2017:420 och 2019:593).

På lång sikt försämras termiska prestanda hos alla värmeisolerande material genom absorption av fukt och vatten, strukturell nedbrytning från termiska och mekaniska laster samt avgasning (isolergaser i skumceller).

Livslängden hos vakuumisolerade paneler är direkt proportionell mot reduktionen av värmeförlusterna i ett fjärrvärmerörssystem som in sin tur är direkt proportionellt mot återbetalningstiden av de initiala investeringarna.

Syftet med detta arbete är att uppskatta livslängden för vakuumisolerade paneler (VIP) i ett fjärrvärmerör med tillgängliga mätdata för att kunna beräkna återbetalningstiden för slutanvändaren, det vill säga energibolaget.

Livslängden är definierad som en funktion av initial värmekonduktivitet, värmekonduktivitet efter lång tid och försämringshastigheten. Den initiala värmekonduktiviteten är bestämd med hjälp av långtidsmätningar i laboratorium.

Resultaten från laboratoriemätningar, fältmätningar och teoretiska beräkningar har använts för att bestämma försämringshastigheten. Försämringshastigheten, baserad på beräkningar och mätningar, bedöms vara mellan 0,5–1 % per år. Vid höga temperaturer, med en försämrings-hastighet av storleken 1%/år kommer det att ta 60 år för att uppnå värmekonduktiviteten 0,015 W/mK.

Energipriser, kostnaden för VIP och reduktion av produktionstakten hos rörtillverkaren dominerar återbetalningstiden. Fjärrvärmerörstyp och -dimension samt polyuretanisoleringens tjocklek är andra parametrar som påverkar återbetalningstiden. Ju tjockare polyuretanisolering desto längre återbetalningstid.

Återbetalningstid för hybridisolerade fjärrvärmerör är i det acceptabla intervallet (3–9 år) för ett enkelt fjärrvärmerör. Användning av hybridisolerade rör är fördelaktigt speciellt om produktionstakten kan förbättras.

Nyckelord

Hybridisolering, vakuum isolerade paneler, livslängd, återbetalningstid

Summary

This report studies the service life and payoff time of hybrid insulated district heating pipes with vacuum insulated panels. The rate of deterioration is estimated to be between 0.5–1% per year. At high temperatures, with a deterioration rate of the magnitude of 1% / year, it will take 60 years to reach the thermal conductivity of 0.015 W/mK. Payoff time for hybrid insulated district heating pipes is in the acceptable range (3–9 years) for a single pipe. Utilization of hybrid insulated pipes are an advantage, especially if the production rate can be improved.

Approximately 10% of the heat energy delivered by a district heating network is lost due to heat losses from the district heating pipes. The loss can be over 40% for parts of the grid where the energy usage is small.

High-performance thermal insulation materials, Vacuum Insulated Panels (VIP), have been investigated for insulation of district heating pipes in the previous projects.

In the long-term, the thermal performance of all thermal insulation materials deteriorates through the absorption of moisture and water, structural degradation from thermal and mechanical loads and degassing (insulating gases in cells).

The service life of vacuum insulated panels is directly proportional to the reduction of heat losses in a district heating pipe system, which in turn is directly proportional to the payoff time of the initial investments.

The purpose of this work is to estimate the service life of VIP in a district heating pipe with available measurement data to calculate the payoff time for the end user, i.e. the energy company.

The service life is defined as a function of initial thermal conductivity, thermal conductivity after a long time and the rate of deterioration. The initial thermal conductivity is determined using long-term measurements (8 years) in the laboratory.

The results from laboratory measurements, field measurements and theoretical calculations have been used to determine the rate of deterioration. The rate of deterioration, based on calculations and measurements, is estimated to be between 0.5–1% per year. At high temperatures, with a deterioration rate of the order of 1% / year, it will take 60 years to reach the thermal conductivity of 0.015 W / mK.

Energy prices, the cost of VIP and reduction of the production rate at the pipe manufacturer dominate the payoff time. District heating pipe type and dimension as well as the thickness of the polyurethane insulation are other parameters that affect the payback time. The thicker the polyurethane insulation, the longer the payback period.

Payoff time for hybrid insulated district heating pipes is in the acceptable range (3–9 years) for a single pipe. Utilization of hybrid insulated pipes are an advantage, especially if the production rate can be improved.

Summary (extend)

This report studies the service life and payoff time of hybrid insulated district heating pipes with vacuum insulated panels. The rate of deterioration is estimated to be between 0.5–1% per year. At high temperatures, with a deterioration rate of the magnitude of 1% / year, it will take 60 years to reach the thermal conductivity of 0.015 W/mK. Payoff time for hybrid insulated district heating pipes is in the acceptable range (3–9 years) for a single pipe. Utilization of hybrid insulated pipes are an advantage, especially if the production rate can be improved.

Approximately 10% of the heat energy delivered by a district heating network is lost due to heat losses from the district heating pipes. The loss can be over 40% for parts of the grid where the energy usage is small.

High-performance thermal insulation materials, Vacuum Insulated Panels (VIP), have been investigated for insulation of district heating pipes in the previous projects.

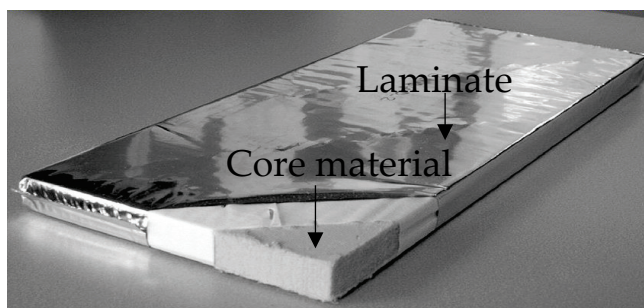


Figure A: Different parts of a vacuum insulated panel

In district heating pipes, the cylindrical vacuum insulated panels are attached closest to the service steel pipe and they are held in place with surrounding polyurethane foam.

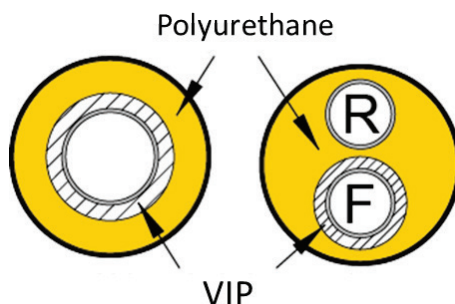


Figure B: Single and twin pipe insulated by vacuum insulated panel

In the long-term, the thermal performance of all thermal insulation materials deteriorates through the absorption of moisture and water, structural degradation from thermal and mechanical loads and degassing (insulating gases in cells).

The service life of vacuum insulated panels is directly proportional to the reduction of heat losses in a district heating pipe system, which in turn is directly proportional to the payoff time of the initial investments.

The purpose of this work is to estimate the service life of VIP in a district heating pipe with available measurement data to calculate the payoff time for the end user, i.e. the energy company.

The service life is defined as a function of initial thermal conductivity, thermal conductivity after a long time and the rate of deterioration. The initial thermal conductivity is determined using long-term measurements (8 years) in the laboratory.

$$Lifetime = \frac{\lambda_{demand} - \lambda_{initial}}{\lambda_{initial} * \Theta}$$

The results from laboratory measurements, field measurements and theoretical calculations have been used to determine the rate of deterioration.

The results of the field measurements are presented in Figure C. The results show the relation between thermal insulation (temperature) of a pipe insulated by VIP and an ordinary pipe insulated by polyurethane. The temperature at the backside of a VIP insulated pipes is in average 30% lower than an ordinary pipe insulated by polyurethane when the supply temperature is about 90 °C. The results also show variation of the VIP quality.

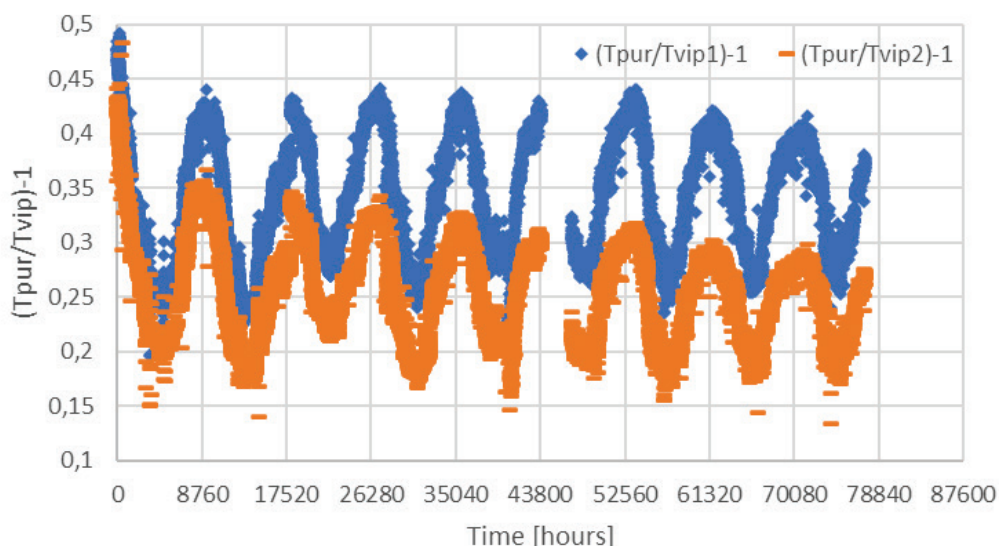


Figure C: Temperatures at backside of VIP 1 and VIP 2

The rate of deterioration, based on calculations and measurements, is estimated to be between 0.5–1% per year. At high temperatures, with a deterioration rate of the order of 1% / year, it will take 60 years to reach the thermal conductivity of 0.015 W / mK.

Energy prices, the cost of VIP and reduction of the production rate at the pipe manufacturer dominate the payoff time. District heating pipe type and dimension as well as the thickness of the polyurethane insulation are other parameters that affect the payback time. The thicker the polyurethane insulation, the longer the payback period.

Tabell D Payoff time for a single district heating pipe DN 80/180, assuming 50% reduction of production rate.

	Energy price [Öre/kWh]			Reduction of VIP-pris [%]
	50	30	20	
Payoff time [year]	3,8	6,5	9,7	10
	3,6	6	9	20

Payback time for hybrid insulated district heating pipes is in the acceptable range (3–9 years), especially if the production rate can be improved.

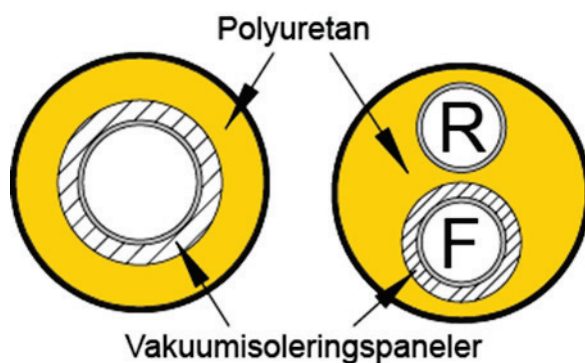
Innehåll

1	Introduktion	12
2	Vakuumisolerade paneler	14
3	Definition av livslängd	15
3.1	Initial värmekonduktivitet	15
3.2	Värmekonduktivitet efter långtid	16
3.3	Försämringshastighet	17
3.3.1	Åtta års mätningar i laboratoriet och fältstation	17
4	Livslängdsmodellen	22
4.1	Livslängd enligt Hanita	22
4.2	Livslängd enligt laboratorimätningar	24
4.3	Livstid enligt fältstationen i Varberg	25
5	Återbetalningstid	26
5.1	Återbetalningstid för ett enkelrör	26
5.2	Återbetalningstid för ett dubbelrör	27
6	Slutsatser	29

1 Introduktion

Fjärrvärmerörets isoleringsmässiga och mekaniska prestanda minskar under dess livstid. Det är viktigt att den producerade värmen levereras till konsumenterna med minsta möjliga förluster. Cirka 10 % av värmeenergin som skickas ut i fjärrvärmenätet försvinner på grund av värmeförluster från fjärrvärmerören. Förlusten kan vara över 40 % för delar av nätet där energiuttaget är litet.

Högpresterande värmeisoleringsmaterial, vakuumisolerade paneler (VIP), har undersökts för isolering av fjärrvärmerör i de tidigare Fjärrsynprojekten Högpresterande fjärrvärmerör och Hybridisolerade fjärrvärmerör (Rapporter 2012:16, 2013:23, 2017:420 och 2019:593). Vakuumpanelerna fästs närmast medieröret och de hålls på plats med omgivande polyuretanskum, se Figur 1. Resultaten från fältmätningar och laborietester visade att en 10 mm vakuumisoleringspanel reducerar värmeförlusterna hos ett dubbelrör med 30 - 40 %. Reduktion av värmeförlusterna kan variera med hänsyn till rörets dimension.



Figur 1 Hybridisolerade enkel och dubbelrör med vakuumisolerade paneler

En viktig fråga för utformning/utveckling av en teknisk komponent är dess tekniska livslängd. Uppskattningen av livslängd är viktigt för tillverkare (för vidareutveckling av produkten och marknadsföringsändamål), såväl som för användare för att fatta beslut om vilka produkter som skall förvärvas för att nå den kortaste återbetalningstiden med högsta prestanda.

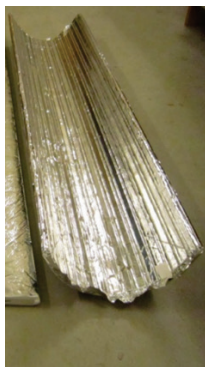
På lång sikt försämras termiska prestanda hos alla värmeisolerande material genom absorption av fukt och vatten, strukturell nedbrytning från termiska och mekaniska laster samt avgasning (isolergaser i skumceller).

Den termiska livslängden för hybridisolerade fjärrvärmerör beror på termiska livslängden hos de ingående isoleringsmaterialen, i detta sammanhang polyuretan (PUR) och den vakuumisolerade panelen (VIP). Hur polyuretanisolering åldras är väl undersökt. Detta arbete fokuserar på livslängden hos vakuumisolerade paneler.

Livslängden hos en VIP är beroende av både dess användningsförhållanden och panelens dimensioner. De flesta studier och modeller för uppskattning av

livslängden för vakuumpplaner är utförda i laboratorium och för tillämpningar som inte liknar förhållandena i ett fjärrvärmerörssystem. Skillnaden mellan en vakuumisolerad panel i ett hybridisolerat fjärrvärmerör och andra tillämpningar:

- I samtliga utförda studier är den vakuumisolerade panelen omgiven av luft eller fuktig luft. Den vakuumisolerade panelen i ett hybridisolerat fjärrvärmerör är omgiven av koldioxid och cyklopentan.
- I ett fjärrvärmerörssystem utsätts VIP för höga temperaturer, 85–120 °C. Sådana temperaturnivåer har inte varit av intresse i andra tillämpningar där VIP används idag.
- Den cylindriska geometrin i ett fjärrvärmerör är en skillnad i jämförelse med andra tillämpningar.



Figur 2 en cylindrisk vakuumisolerad panel

Utvecklingen av hybridisolerade fjärrvärmerör och deras livslängd har undersökts i ett antal projekt från 2010 till 2021 i laboratorium och i fältstationer. Idag har vi tillgång till 8 års mätdata från laboratorium (enkelrör) och i fältstation (dubbelrör).

Livslängden hos vakuumisolerade paneler är direkt proportionell mot reduktionen av värmeförlusterna i ett fjärrvärmerörssystem som in sin tur är direkt proportionellt mot återbetalningstiden av de initiala investeringarna.

Syftet med detta arbete är att uppskatta livslängden för vakuumisolerade paneler (VIP) i ett fjärrvärmerör med tillgängliga mätdata och att kunna beräkna återbetalningstiden för slutanvändaren, det vill säga energibolaget.

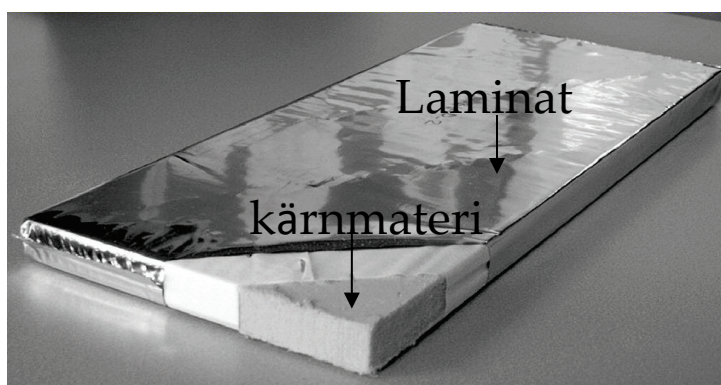
Det första målet med detta projekt är att fastställa livslängden hos hybridisolerade fjärrvärmerör genom att utveckla en degraderingsmodell av den termiska prestandan med hjälp av insamlade mätdata från laboratorium och fältstationer under senaste 8 åren.

Den andra målet att utveckla ett kostnadsnyttoanalys-verktyg som kan visa på återbetalningstid för ledningsutbyte givet vilket rör/rösträcka som ersätts. Det skall ta i beaktande hur kostnaden för rören kan tänkas minska beroende på antal som produceras.

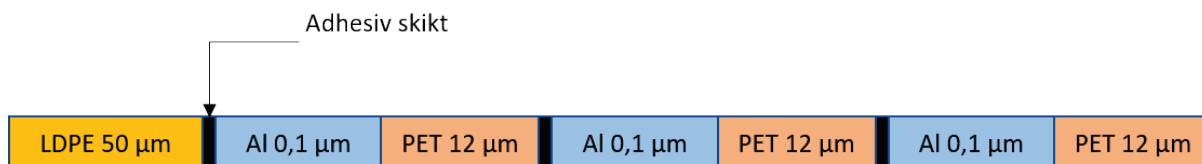
Den tredje målet är att samla data från de befintliga fältstationerna.

2 Vakuumisolerade paneler

Vakuumisolerade paneler består huvudsakligen av ett laminat (barriärfilm) och ett kärnmaterial, se Figur 3. Laminatets huvudfunktion är att förhindra luft- och fukttransport mellan omgivningen och kärnmaterial. Följaktligen beror livslängden för VIP först och främst på barriäregenskaperna hos laminatet. Laminatet består av ett antal skikt med en total tjocklek av cirka 100 mikrometer. En schematisk uppbyggnad av de olika skikten i ett laminat är presenterat i Figur 4.



Figur 3 Vakuumisolerade paneler



Figur 4 Ett VIP laminat består av olika skikt, LDPE: Lågdensitetspolyeten, Al: Aluminiumfolie, PET: Polyetentereftalat

Laminatets uppbyggnad kan variera. Till exempel kan skiktet med aluminium ersättas av metalliserade skikt, och adhesivskiktet kan vara olika typer av polymerer. Vakuumpanelerna i denna studie har ett laminat med aluminiumfolie och kärnmaterial av kiseldioxid (fumed silica).

3 Definition av livslängd

Uppskattningen av livslängd för en produkt är knuten till vilka kriterier/krav som ställs på produkten, exempelvis att produkten inte skall försämrats mer än 10 % under 2 år. Att uppfylla kraven under en vis tid betyder att produkten är duglig för att uppfylla sin funktion i en tilltänkt tillämpning. Med hänsyn till ovanstående beskrivning kan livslängden för vakuumisolerade paneler formuleras som:

$$\text{Livslängd} = \frac{\lambda_{krav} - \lambda_{initial}}{\lambda_{initial} * \theta}$$

λ är värmekonduktivitet [W/mK] och θ är försämringshastighet [% /år]

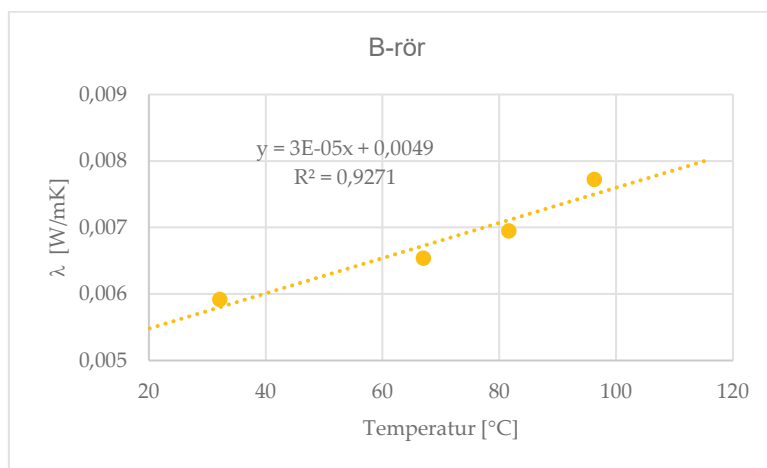
λ_{krav} är den högsta värmekonduktiviteten som kan accepteras och $\lambda_{initial}$ är värmekonduktiviteten vid den aktuella temperaturen för det hybridisolerade fjärrvärmeröret vid de första månaderna i drift.

När det gäller livslängden för hybridisolerade rör bör den initiala värmekonduktiviteten, den slutliga värmekonduktiviteten efter långtid (krav) vid den aktuella temperaturen definieras och försämringshastigheten bestämmas.

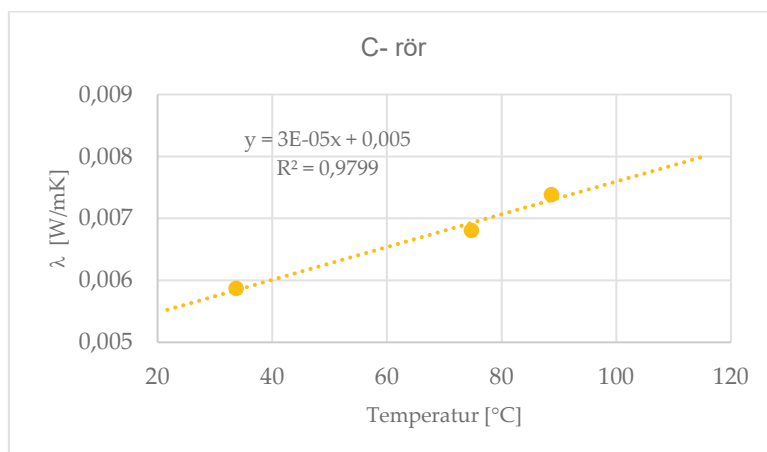
3.1 INITIAL VÄRMEKONDUKTIVITET

Tillverkarna av vakuumpaneler deklarerar en värmekonduktivitet i mitten av panelen (COP - center of panel) i intervallet 0,0035–0,0045 W/mK vid 10 °C. Det deklarerade värdet gäller för platta vakuumisolerade paneler. Det är svårt att mäta värmekonduktiviteten med tillräcklig noggrannhet för en cylindrisk panel, Figur 2.

Värmekonduktiviteten (i mitten av panelen) för cylindriska paneler vid olika temperaturer är bestämd med hjälp av tillgängliga data från två olika försök (två provkroppar) i laboratorium. Resultaten av mätningar presenteras i Figur 5, Figur 6 och Tabell 1. Temperaturen i figurerna är medeltemperaturen över panelens tjocklek.



Figur 5 variationen av värmekonduktivitet med temperatur i provkropp B.



Figur 6 Variationen av värmekonduktivitet med temperatur i provkropp C.

Tabell 1 variation av värmekonduktivitet vid olika temperaturer

Temperatur [°C]	33	67	75	89	96
Värmekonduktivitet [W/mK]	0,0059	0,0065	0,0068	0,0074	0,0077

Värmekonduktiviteten i Tabell 1 kommer att användas som de initial värmekonduktiviteten vid beräkningar av livstiden och återbetalningstiden för hybridisolerade fjärrvärmerör.

3.2 VÄRMEKONDUKTIVITET EFTER LÅNGTID

Den termiska livslängden för ett fjärrvärmerör skall i enlighet med SS-EN 253 vara mer än 50 år vid en kontinuerlig drifttemperatur lägre än 115 °C. Termiska livslängden i SS-EN 253 refererar till termiska spänningar och inte till rörets isoleringsförmåga. När det gäller isoleringsförmågan ställer SS-EN 253 kravet att ett nyproducerat fjärrvärmerör skall ha en värmekonduktivitet lägre än 0,029 W/mK vid 50 °C. Med hänsyn till att värmekonduktiviteten hos vakuumisolerade paneler (0,005–0,008 W/mK) är väsentligt bättre än polyuretanisoleringen (0,025–0,029 W/mK), uppfyller ett nyproducerat hybridisolerat fjärrvärmerör kravet i SS-EN 253. Efter lång tid kan lufttrycket i en vakuumisolerad panel öka från 0,005 bar (vakuum) till 1 bar under panelens livstid. Resultatet från mätningar i laboratorium visar att när lufttrycket i panelen är lika med atmosfäriska trycket (1 bar) kommer den vakuumisolerade panelens värmekonduktivitet vara i intervallet 0,020–0,022 W/mK som är lika med kärnmaterialets (kiseloxid) värmekonduktivitet. Slutsatsen är att en punkterad VIP, fylld med luft, har lägre värmekonduktivitet än polyuretanisolering. Detta betyder att ett åldrat hybridisolerat fjärrvärmerör kommer att ha bättre prestanda än en polyuretanisolerade rör efter lång tid.

Den vanligaste definitionen för livslängden av en panel är att den effektiva värmeledningsförmågan fördubblas från dess ursprungliga värde. En annan, mindre vanlig, definition är när den värmeledningsförmågan, i genomsnitt över tid, når ett förutbestämt kritiskt värde.

I detta projekt antas att den termiska livslängden av vakuumisolerade paneler är uppnådd när värmekonduktiviteten av panelen är större eller lika med 0,020 W/mK. det vill säga värmekonduktiviteten för kärnmaterialet i en omgivning av luft. Med detta antagande underskattar vi vakuumisolerade panelers isoleringsförmåga. De befintliga gaserna i ett fjärrvärmerör med polyuretanisolering är koldioxid och cyklopentan. Dessa gaser har lägre värmekonduktivitet (0,013–0,015 W/mK) än luft (0,024 W/mK). Vakuumpaneler i ett fjärrvärmerörssystem efter att gastrycket i panelen når 1 bar har säkerligen lägre konduktivitet än 0,020 W/mK.

3.3 FÖRSÄMRINGSHASTIGHET

När den initiala konduktiviteten och konduktiviteten efter lång tid är definierad skall försämrings-hastigheten per år bestämmas. Försämringshastigheten uppskattas med hjälp av åtta års mätningar i laboratoriet och fältstation i Varberg.

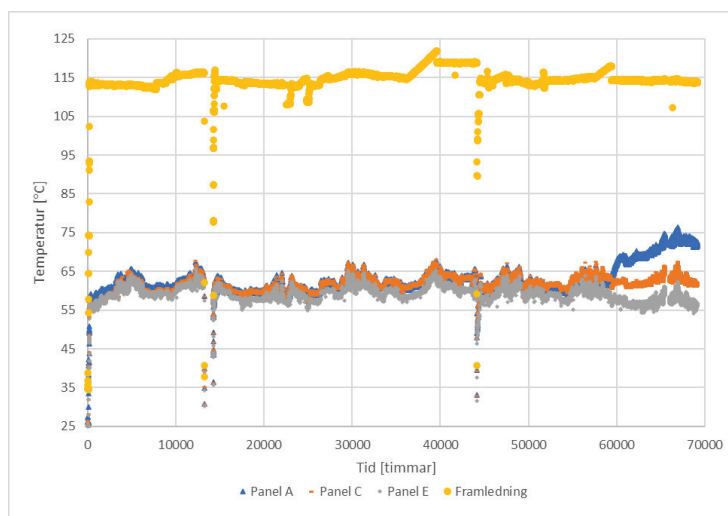
3.3.1 Åtta års mätningar i laboratoriet och fältstation

Mätdata har samlats i laboratoriemiljö och från fältstationen i Varberg. Mätdatainsamlingen inleddes i början av 2012 i fältstationen i Varberg och i slutet av 2012 i laboratoriemiljö.

I laboratoriet mäts termiska prestanda för ett singelrör (DN80x180) och i fältstationen övervakas ett dubbelrör (DN2*80/250).

Mätningar i laboratoriet

Långtidsmätningar på ett hybridisolerat enkelrör pågår i laboratoriet. Mätresultaten presenterades i Energiforsks Rapport 2019:593. Datasamlingen har kompletterats med mätdata till och med 2020-11-17. Röret är isolerat med 3 vakuumisolerade paneler, Panel (A), Panel (C) och Panel (E). Panelernas tjocklek är 10 mm. Temperaturen är mätt på baksidan (den utvändiga ytan) av panelerna (i mitten av panelen). Röret har haft en konstant framledningstemperatur på 115 °C i över 8 år. Temperaturmätningar är presenterad i Figur 7.



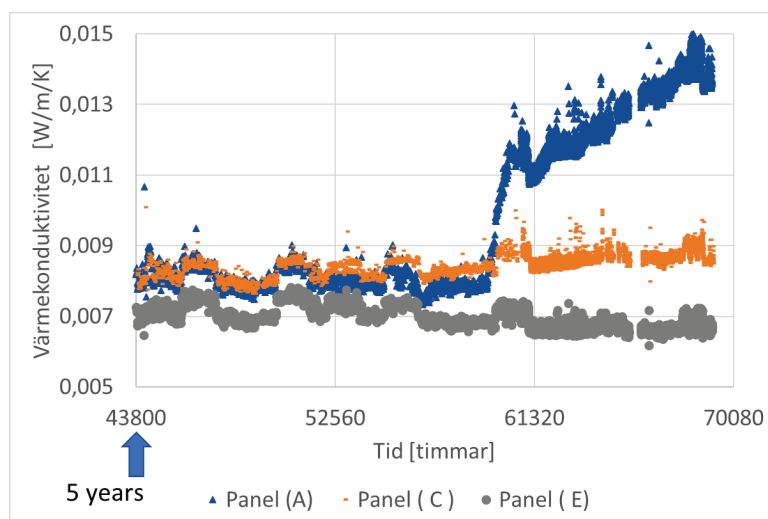
Figur 7 Framledningstemperatur och temperaturen på baksidan av vakuumisolerade paneler A, C och E

Temperaturen på baksidan av de vakuumisolerade panelerna (10 mm från stålröret) ligger i intervallet 55–60 °C under 7 år. Det beräknade värdet i samma position för polyuretanisolering är 88 °C.

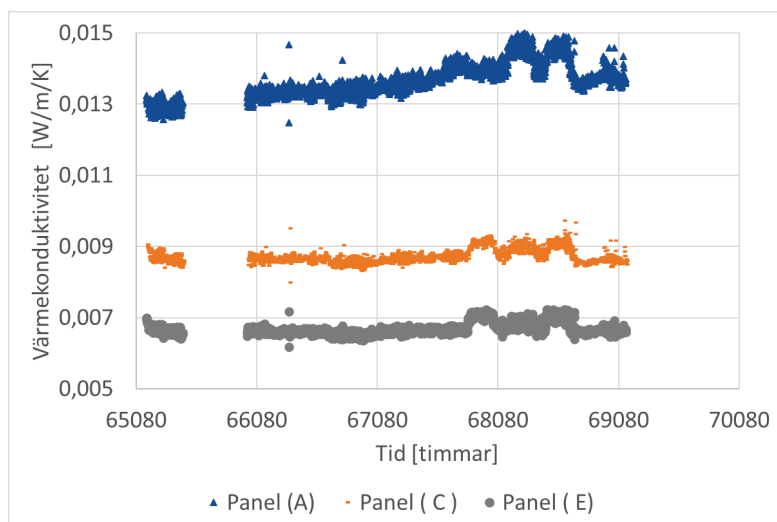
Efter nästan 7 år, med framledningstemperatur 115 °C, har temperaturen på baksidan av Panel (A) börjat att stiga över intervallet 55–60 °C och detta är ett tecken på att Panel (A) har förlorat sin initiala värmeisoleringsförmåga. Panelerna (C) och (E) är fortfarande intakta.

Värmeledningsförmågan för panelerna har beräknats med hjälp av tillgängliga mätdata. Resultaten redovisas i Figur 8. Resultatet i Figur 8 visar att värmeledningsförmågan för panelerna ligger i intervallet 0,007–0,009 W/mK efter 8 år. Detta intervall överensstämmer med resultaten av mätningar som presenterades i Figur 5 och Figur 6.

Konduktiviteten hos Panel (A) börjar att stiga efter 6,8 år vid 115 °C. Stegningen av konduktivitet visar två olika lutningar med en svag indikation att försämringen av konduktiviteten har blivit stabil i området 0,014–0,0015 W/mK, se Figur 9.



Figur 8 Utvecklingen av värmeledningsförmåga för Paneler(A), (C) och (E) under 8 år



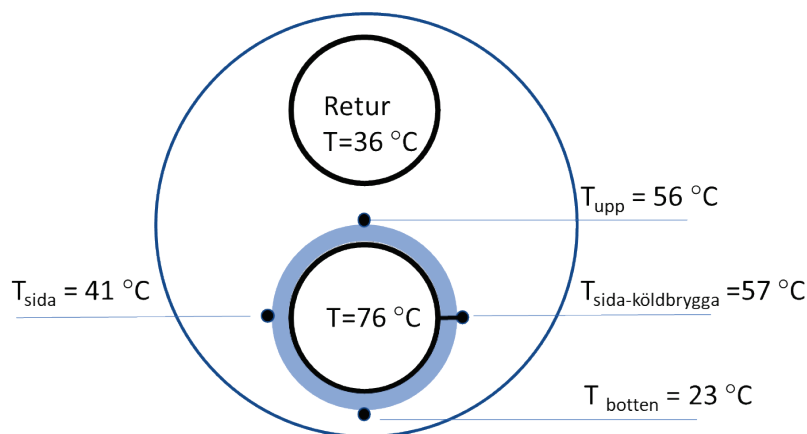
Figur 9 Förändring av värmekonduktivitet är stabil under de senaste 7 månaderna

Värmekonduktiviteten hos Panel (A) ligger mellan 0,014–0,015 W/mK efter försämring. Detta intervall överensstämmer med värmekonduktiviteterna hos gaserna i ett fjärrvärmerör med polyuretanisolering, det vill säga för koldioxid och cyklopentan (0,014–0,015 W/mK).

Mätningar i fältstation-Varberg

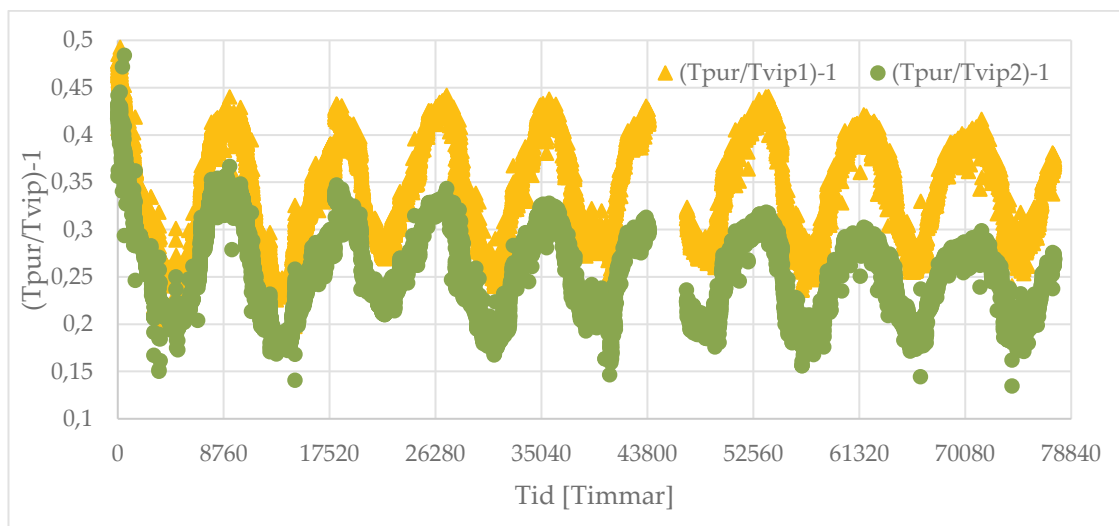
Fältstationen vid Susvindvägen (Varberg) initierades den 19 januari 2012. Ett dubbelrör DN2*80/250 har isolerats med 3 vakuumisolerade paneler (10 mm tjock). Ett antal termo-element finns inbäddat i det hybridisolerade röret. En av panelerna är inte utrustad med samtliga termoelement. Datasamlingen har kompletterats med mätdata till och med 2020-11-26 (totalt 8 år och tio månader).

Att bestämma vakuumisolerade panelers värmekonduktivitet i ett dubbelrör i drift är mycket komplicerat och osäkert. Anledningar till detta är att temperaturutvecklingen runt panelen inte är symmetrisk och att retur- och framledningstemperaturer varierar. I Figur 10 visas temperaturen på termoelementen som sitter på baksidan av den vakuumisolerade panelen (som isolerar framledningsröret) efter 1 år.



Figur 10 Temperaturen runt en vakuumisolerad panel efter 1 år i en dubbelrör

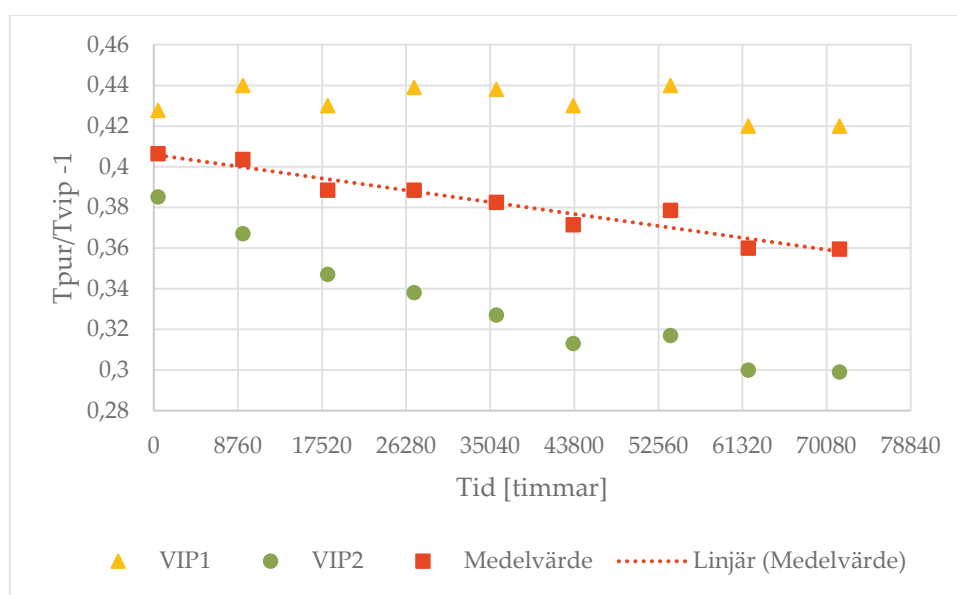
För att kvantifiera försämringshastigheten hos vakuumisolerade paneler har mätdata från 2012–2020 analyserats. Vakuumisolerade panelernas prestanda har evaluerats genom att jämföra temperaturen på baksidan av panelen i 'sido'-position med temperaturen i polyuretanisoleringen, 10 mm från framledningsröret. Resultaten är presenterat i Figur 11.



Figur 11 Temperaturen på baksidan av vakuumisolerade paneler VIP 1 och VIP 2, position 'sida'

Resultaten i Figur 11 visar att panelernas prestanda inte är likartad. 'VIP2' isolerar inte lika bra som 'VIP1'. Detta kan bero på kvalitetsskillnad mellan paneler och skillnad vid montering av paneler.

Genomsnittet av maximumvärdet under varje år från 'VIP1' och 'VIP2' har använts för uppskattning av försämringshastigheten, se Figur 12.



Figur 12 Maximumvärden av $(T_{pur}/T_{vip})-1$

Resultaten i Figur 12 kan tolkas på två olika sätt. Den ena alternativet är att försämringshastigheten i 'VIP 1' är obefintlig och att 'VIP 2' har en försämringshastighet av storleken 1 % per år. Den andra alternativet är att bilda ett medelvärde av VIP 1 och VIP 2 och dra slutsatsen att försämringshastigheten är i storleksordningen 0,5 % per år.

4 Livslängdsmodellen

Luft och fukt tränger in i en vakuumisolerad panel (VIP) med tiden och detta leder till att det inre trycket ökar successivt (värmeledningsförmågan ökar), vilket försämrar panelens termiska prestanda. Många studier har gjorts för att undersöka försämringen av VIP över tiden och forskarna har försökt kvantifiera åldringsmekanismerna hos vakuumisoleringspaneler. Nästan alla studier handlar om byggnaders klimatskal. Huvudsakligen finns två faktorer som påverkar den termiska prestandan hos en VIP: internt gastryck och internt fuktinnehåll. Luft- och fuktdiffusionskoefficienterna för laminatet (barriärfilmen, se Figur 3) är de viktigaste parametrarna vid bestämning av livstiden för en VIP.

Åldringsmekanismer för VIP i ett hybridisolerat fjärrvärmerör skiljer sig från dem i byggnaders klimatskal. De viktigaste skillnaderna är:

- a) Det finns nästan ingen fukt i hybridisolerade rör
- b) Gaser i omgivningen av VIP är inte luft
- c) Temperaturnivåerna i fjärrvärmesystemet är mycket högre än dem i byggnader

Alla dessa skillnader leder till att de befintliga modellerna inte kan användas utan kompletterande mätningar av diffusionskoefficienter för koldioxid och cyklopentan. Med kunskap om att våra paneler inte är omgivna av luft, används en befintlig modell som har utvecklats av Hanita-Averydennison, tillverkaren av laminatet i de vakuumisolerade panelerna i detta projekt.

En annan utmaning är att de befintliga modellerna antar en successiv försämring som inte stämmer med resultaten för hybridisolerade fjärrvärmerör i laboriemätningar.

4.1 LIVSLÄNGD ENLIGT HANITA

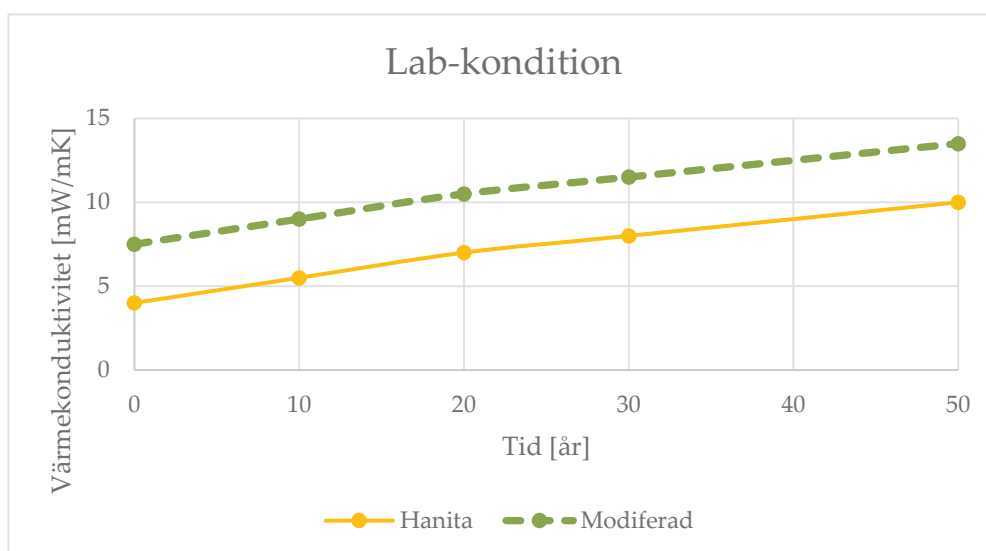
I samarbete med tillverkaren av barriärfilmen har livslängden för vakuumisolerade paneler beräknats teoretiskt för förhållanden som råder i utförda mätningar i laboriet och fältstationen (Varberg), se Tabell 2. Vid beräkningarna antas att det inte finns någon fukt i omgivningen kring de vakuumisolerade panelerna och att panelerna är omgivna av luft. De vakuumisolerade panelerna i laboriet är utsatta för en konstant temperatur (115 °C framledningstemperatur på ena sidan och 65 °C på baksidan av panelen). De vakuumisolerade panelerna i fältstationen är utsatta för temperaturväxlingar, det vill säga vinter- och sommarförhållanden. Medelvärde av temperaturer på respektive sida av de vakuumisolerade panelerna i fältstationen under vinter och sommar redovisas i Tabell 2.

Tabell 2 Temperaturförhållanden i beräkningar för fältstationen

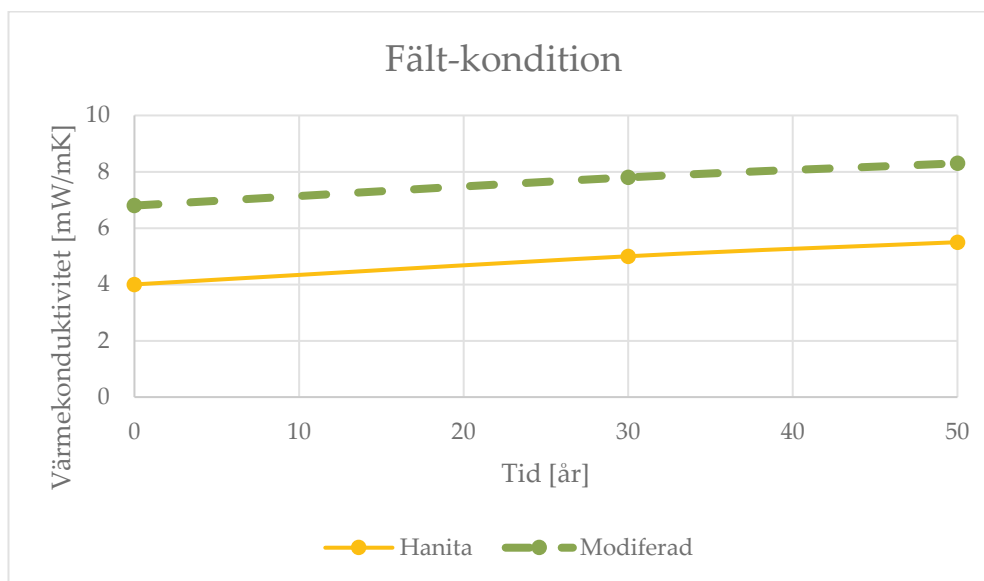
	Vinter	sommar
T framledning	85	65
T baksidan av panelen	50	40
Antal månader	8	4

Hanita-beräkningarna antar en initial värmekonduktivitet av 0,004 W/mK. Den initiala värmekonduktiviteten stämmer inte med de uppmätta värdena i detta projekt. I avsnitt 3.1 och Tabell 1 visas att den initiala värmekonduktiviteten vid en medeltemperatur av 90 °C (i mätningar i laboratorium) och 75 °C (i fältmätningar) är högre än 0,004 W/mk.

Resultaten från Hanita-beräkningarna har modifierats med hänsyn till den uppmätta värmekonduktiviteten i vakuumisolerade paneler i laboratoriet, se Figur 13 och Figur 14.



Figur 13 Livslängdberäkning för vakuumisolerade paneler i laboratoriet enligt Hanita-modellen



Figur 14 Livslängdberäkning för vakuumisolerade paneler i fältstationen enligt Hanita-modellen

Enligt Hanita-beräkningarna är den genomsnittliga försämringen vid laboriemätningar cirka 1,5 % per år och vid fältstationen cirka 0,5 % per år. Efter 50 år skall värmekonduktiviteten vid laboriemätningar vara cirka 0,014 [W/mK] och vid fältstationen runt 0,008 [W/mK].

4.2 LIVSLÄNGD ENLIGT LABORATORIMÄTNINGAR

I laboriet utsätts 3 paneler, i ett enkelrör, för en framledningstemperatur runt 115 °C. Ingen successiv försämring kan identifieras under de första 81 månaderna. En av panelerna punkteras efter 6,8 år (81 månader) och de två andra panelerna behåller sin prestanda efter 7,9 år (95 månader), enligt senaste datasamlingen (2020-11-17), se Figur 8. Figur 8 visar också att de finns en skillnad mellan de två paneler som har behållit sin isoleringsförmåga. Medelvärde av värmekonduktiviteten för paneler som behållit sin isoleringsförmåga är 0,008 [W/mK].

Tre möjliga slutsatser kan dras för livslängden av vakuumisolerade paneler:

- Panelerna förlorar den höga isoleringsförmågan efter nästan 81 månader vid en konstant framledningstemperatur av 115 °C. Efter 81 månader ligger värmekonduktiviteten runt 0,014 [W/mK]. Detta är värsta fallet för livstidsberäkningar av vakuumisolerade paneler.
- 30 % av panelerna förlorar den höga isoleringsförmågan vid en konstant framledningstemperatur och de resterande behåller sin förmåga över 50 år enligt Hanita-beräkningarna.
- Panelen som har förlorat sin höga isoleringsförmåga är en avvikelse och de resterande panelerna kommer att behålla sin förmåga över 50 år enligt Hanita-beräkningarna. Detta är bästa fallet.

Med antagandet att vakuumpanelen (Panel A), som har förlorat sin isoleringsförmåga, är en avvikelse och den därför kan elimineras, stämmer resultatet från laboratoriemätningar med Hanita-beräkningarna efter modifiering för höga temperaturer.

4.3 LIVSTID ENLIGT FÄLTSTATIONEN I VARBERG

Tre paneler i ett dubbelrör utsattes för säsongsbaserade växlingar i fram- och returledningen enligt Tabell 2. En av vakuumpanelerna är en reservpanel och den var inte utrustad med samtliga termoelement. Resultaten av resterande paneler visar att en av panelerna har en obetydlig försämring och den andra försämras med 1 % procent per år, se Figur 12.

Två möjliga slutsatser kan dras för livslängden av vakuumisolerade paneler:

- d) Panelerna har inte samma kvalitet. Det är också möjligt att monteringen av panelerna har inte varit helt likartad.
- e) Medelvärdet av vakuumpanelerna försämringshastighet är 0,5 % per år.

Medelvärdet av försämringshastigheten i fältstationen är lika med Hanita-beräkningarna.

5 Återbetalningstid

Med antagandet att vakuumisolerade paneler kan bibehålla sin höga termiska prestanda under 30 år, skall en återbetalningsmodell utvecklas.

Återbetalningstiden påverkas av hybridrörets termiska prestanda vilken karaktäriseras av vakuumpanelens och polyuretanets värmekonduktivitet, energipriset och produktionskostnaden för hybridrören. Produktionskostnaden beror av vakuumpanelens och polyuretanets kostnad och rörens produktionstakt där en lägre produktionstakt leder till högre produktionskostnad i och med att de fasta kostnaderna hos producenten är samma.

5.1 ÅTERBETALNINGSTID FÖR ETT ENKELRÖR

Beräkningar av återbetalningstiden baseras på värmeförluster från Fjärrvärmeröret DN 80/180 som är bland de mest sålda rören enligt POWERPIPE Systems AB.

Fjärrvärmeröret har isolerats med en 10 mm tjock vakuumisolerad panel. För att uppnå tillräckligt skjuvkraft i ett enkelrör, isoleras bara 50% av rörlängden med vakuumisolerade paneler. Vid beräkningar av värmeförluster har medelvärdet av värmekonduktiviteten under 30 år använts. Värmeförluster har beräknats med en analytisk modell. De totala värmeförlusterna under 1 år har beräknat med antagandet att framledningstemperatur är under 8 månader (uppvärmningssäsong) 85° och 65 °C under 4 månader (sommartid). Inverkan av köldbryggor har kompenserats med att minska längden av vakuumisolerade paneler med 5 %. Indata för beräkning av värmeförluster är presenterad i Tabell 3 Indata till värmeförlustberäkningar

Tabell 3 Indata till värmeförlustberäkningar - enkelrör

	Medelvärde under 30 år Värmekonduktivitet [W/mK]	[°C]	Kommentarer
Vakuumisolerad panel	0,007		Se, Figur 13
Polyuretan	0,0273		10 % försämring under 30 år från ett initialt värde av 0,026 [W/mK], enligt tidigare resultat i projektet.
Framledningstemperatur		85	Uppvärmningssäsong 8 månader
Framledningstemperatur		65	Sommar 4 månader
Marktemperatur		5	

Kostnader för vakuumisolerade paneler och polyuretanisolering är i enlighet med uppgifter från tillverkare av respektive isoleringsmaterial. Produktionstakten kan minska med 50 % enligt POWERPIPE Systems AB. Återbetalningstid har beräknat för tre energipriser (50, 30 och 20 öre/kWh) och två produktionstakter. Tabell 4 visar indata vid beräkning av återbetalningstid.

Tabell 4 Indata till återbetalningstid

Pris	[kr/m ³]	[kr/m ² /10mm]	[kr/kWh]	[%]	Kommentarer
PUR	3600	36			
VIP	34 000	340			Upp
VIP		304			Efter reduktion för PUR-pris
Energipris			0,5–0,7		
Produktionstakt				50	Motsvarar cirka 204 kr/m

Återbetalningstid för ett enkelt fjärrvärmerör DN80/180 har uppskattats för tre energipriser och två produktionstakter. Resultaten presenteras i Tabell 5.

Tabell 5 Återbetalningstid för ett enkelt fjärrvärmerör DN 80/180

	Energipris [Öre/kWh]			Produktionstakt [%]
	50	30	20	
Återbetalningstid [år]	2,5	4,6	7,0	100
	4,2	6,9	10,4	50

Återbetalningstiden har beräknats för lägre VIP-priser och 50 % produktionstakt. Resultatet redovisas i Tabell 6.

Tabell 6 Återbetalningstid för ett enkelt fjärrvärmerör DN80/180, 10 och 20% prisminskning av VIP

	Energipris [Öre/kWh]			Reducering av VIP-pris [%]
	50	30	20	
Återbetalningstid [år]	3,8	6,5	9,7	10
	3,6	6,0	9,0	20

Resultaten i Tabell 5 visar att om produktionstakten för ett hybrid isolerat fjärrvärmerör kan uppnå samma nivå som produktion av ordinarie rör, är hybridisolering en lönsam investering.

5.2 ÅTERBETALNINGSTID FÖR ETT DUBBELRÖR

Återbetalningstiden för ett dubbelrör 2x80/280 är beräknad. Fjärrvärmeröret har isolerats med en 10 mm tjock vakuumisolerade panel. Vid beräkningar av värmeförluster har medelvärdet av värmekonduktiviteten under 30 år använts. Värmeförlusterna har beräknats med hjälp av en numerisk modell baserad på FEM (Finita Element-Metoden). Totala värmeförlusten under 1 år har beräknats med antagandet att framlednings- och returtemperaturer under 8 månader (uppvärmningssäsong) är 85 °C och 55 °C och under 4 månader (sommartid) är 65 °C och 50 °C. Inverkan av köldbryggor har kompenserats med att minska längden av vakuumisolerade paneler med 5%. Indata för beräkning av värmeförluster är presenterad i Tabell 7. Övriga indata för återbetalningstid för ett dubbelrör är presenterad i Tabell 5.

Tabell 7 Indata till värmeförlustberäkningar - dubbelrör

	Medelvärde under 30 år Värmekonduktivitet [W/mK]	[°C]	Kommentarer
Vakuumisolerade panel	0,007		Se, Figur 14
Polyuretan	0,0273		10 % försämring under 30 år från ett initialt värde av 0,026 [W/mK], enligt tidigare resultat i projektet.
Framledningstemperatur		85	Uppvärmningssäsong
returtemperatur		55	
Framledningstemperatur		65	Sommar
returtemperatur		50	
Marktemperatur		5	

Återbetalningstid för ett dubbelrör DN 2x80/280 har uppskattats för tre energipriser och två produktionstakter. Resultaten presenteras i Tabell 8.

Tabell 8 Återbetalningstid för ett dubbelrör 2x80/280

	Energipris [Öre/kWh]			Produktionstakt [%]
	50	30	20	
Återbetalningstid [år]	5,5	9,1	13,6	100
	8,2	13,6	20,4	50

Återbetalningstiden för ett dubbelrör är längre än ett enkelrör med nästan 4 år när produktionstakten är halverad. Normalt är ett dubbelrör mer energieffektivt än ett enkelrör och detta leder till att återbetalningstiden för ett dubbelrör blir längre.

6 Slutsatser

Livslängden är definierad som en funktion av initial värmekonduktivitet, värmekonduktivitet efter lång tid och försämringshastigheten.

Den initiala värmekonduktiviteten är bestämd med hjälp av långtidsmätningar (8 år) i laboratorium. Värmekonduktiviteten varierar med temperaturen. Denna variation skall beaktas vid beräkning av värmeförluster.

Vakuumisolerade panelers prestanda varierar. Vid laboratoriemätningar har en av tre vakuumisolerade paneler delvis förlorat sin isoleringsförmåga efter nästan 7 år vid 115 °C. Värmekonduktiviteten för denna panel ligger i intervallet 0,014–0,016 W/mK (som är bättre än värmekonduktiviteten för PUR 0,026) W/mK). Variationer i vakuumpanelernas kvalitet observerades även vid fältstationen i Varberg.

Resultaten från laboratoriemätningar, fältmätningar och teoretiska beräkningar har använts för att bestämma försämringshastigheten. Försämringshastigheten, baserad på beräkningar och mätningar, bedöms vara mellan 0,5–1 % per år. Teoretiska beräkningar är utförda av barriärskiktets tillverkare (Hanita) och baseras på luft- och fuktdiffusionskoefficient för barriärskiktet. Gaserna i de studerade fjärrvärmerörerna har lägre värmekonduktivitet än luften. Detta leder till att den slutliga värmekonduktiviteten, när trycket i panelen är lika med en bar, kommer att vara runt 0,015 W/mK som är nästan två gånger bättre än värmekonduktiviteten hos polyuretan. Vid höga temperaturer, med en försämrings-hastighet av storleken 1%/år kommer att ta 60 år för att uppnå värmekonduktiviteten 0,015 W/mK.

Energipriser, kostnaden för VIP och reduktion av produktionstakten hos rörtillverkaren dominerar återbetalningstiden. Fjärrvärmerörstyp och -dimension samt polyuretanisoleringens tjocklek är andra parametrar som påverkar återbetalningstiden. Ju tjockare polyuretanisolering desto längre återbetalningstid.

Återbetalningstid för hybridisolerade fjärrvärmerör är i det acceptabla intervallet (3–9 år) för ett enkelt fjärrvärmerör. Användning av hybridisolerade rör är fördelaktigt speciellt om produktionstakten kan förbättras.

UPPSKATTNING AV DEN TEKNISKA LIVSLÄNGDEN HOS HYBRIDISOLERADE FJÄRRVÄRMERÖRR

Ungefär en tiondel av den värmeenergi som skickas ut i fjärrvärmenätet försvinner genom värmeförluster från fjärrvärmerören. Förlusten kan vara över 40 procent för delar av nät där energiuttaget är litet. Ett hybridisolerat fjärrvärmerör kan reducera värmeförlusterna i fjärrvärmenätet väsentligt.

Här har resultat från laboriemätningar, fältmätningar och teoretiska beräkningar använts för att bestämma hastigheten av försämringarna.

Syftet har varit att uppskatta livslängden för vakuumisolerade paneler i ett fjärrvärmerör med tillgängliga mätdata för att kunna beräkna återbetalningstiden för fjärrvärmeföretaget. Att använda hybridisolerade rör är fördelaktigt speciellt om produktionstakten kan förbättras.

Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin.